

とやまと自然

第37巻秋の号

No.147 2014

宇宙^{うちゅう}を満たすダークマターを探^{さが}す

鈴木 洋一郎



(c) 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

岐阜県飛騨市神岡町の地下 1,000 メートルの実験室でおこなっているダークマター探索実験 (XMASS) の中心部が写真中央に見えます。完成したときに撮影したものです。使用されている直径 5cm の光センサー 642 本の後ろの部分が、丸い薄い出っ張りのように見えています。白い糸のようなものは、信号を伝送するケーブルです。この写真では見えませんが、球体の内側に向いている光のセンサー前面が、球体の内面積のほぼ 62% を占めています。球体の中には約 850kg の液体キセノンが貯められます。ダークマターとの稀な反応によりキセノン原子が蹴り出され、そのキセノンが得たエネルギーが最終的に光となって放たれ、光センサーにより検出されます。塵等に含まれている放射線不純物が出す放射線が、同じような光をだすので、ダークマターを観測するときのノイズ源となります。したがって、このような防護服、キャップ、マスク、手袋の重装備で作業にあたり、髪の毛や、服のほこり等が測定器につかないようにします。防護服は人を守るのではなく、人や服から不純物が飛び散らないようにしているのです。ダークマターの観測には、測定器を極限まできれいにする必要があります。

宇宙を満たすダークマターを探す

鈴木 洋一郎（東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構）

我々の住んでいるこの地球には、宇宙から様々なものが、飛び込んできています。その代表的なものは光です。飛び込んできた光によって、お星様の様子や宇宙の様子を見る事、知る事ができます。

光は波の性質を持っていて、紫色の光よりも波長が短い紫外線やX線は、目にはみえません。また、赤色よりも波長が長い赤外線も目にはみえません。しかし、それらの波長にあった観測機器、たとえばX線望遠鏡や赤外線望遠鏡を使えば見る事ができます。人間の目には見えないものを含め、これらの光の親戚を電磁波といいます。電磁波は、星や星間物質、銀河など、宇宙のあらゆるところからやってきます。

我々の知っている原子や分子は、実は電磁波と深く結びついています。原子・分子のまわりには、電子が回っています。もっと正しく言うと、雲のように巻き付いています。驚く事には、電子が雲のように巻き付く仕方には、いくとおりもあるのです。例えば、原子には、電子が居ることのできる階のようなものがあると思ってよいでしょう。上の階にゆくためには、押し上げてもらわなければいけません。エネルギーをもらって上の階にゆきます。下の階に戻るためには、エネルギーを放出しなければいけません。ここで、上の階に押し上げるためのエネルギーや、放出されるエネルギーが光や紫外線、赤外線等の電磁波なのです。宇宙にある原子・分子は、電磁波からエネルギーをもらったり出したりして、エネルギーを出すときには、光ることになります。

太陽のように自ら光り輝くお星さまのエネルギーの源は、電子の「階の行き来」からくるのではなく、原子の中心部にある原子核が直接関与するものですが、最後は、電磁波として星の表面からエネルギーの放出がおこります。いずれにしろ、我々の知っている物質である原子・分子は、まわりをまわっている電子が関与した

り、その中心にある原子核が関与したりして、光り輝くことができる「見える物質」なのです。電磁波を観測することにより、宇宙における、原子・分子の存在が分かることになります。

今日は宇宙を満たしている「見えない物質」すなわち望遠鏡を使っても見えないもののお話です。それはダークマターとよばれています。しかし、どうして見えないものがあると言えるのでしょうか。そして、ダークマターの役割は为什么呢。何故そんなものがあるのでしょうか。そして、その正体は为什么呢。

■銀河はまわっている？

ダークマターと銀河の話をもっと詳しくしましょう。だけど、いきなり銀河って言われても困りますね。なんだか分からないし、あまり聞いた事もないかもしれません。それでは、銀河の話をする前に、まずお星様の話からしましょう。



図1：NGC4414と呼ばれる銀河。
かみのけ座にあり、地球から6,200万光年離れています。
光の速さで6,200万年かかる距離にあります。

我々は、太陽の周りを回っている地球という惑星に住んでいます。太陽はその中心部分で核融合反応をおこして、得られたエネルギーで光り輝いています。自らエネルギーを作りだしている星は恒星とよばれます。太陽系以外に惑星があることは、最近になって、漸く分かってきたことです。したがって、宇宙規模で星といえ

ば、普通には恒星のことをさします。これからはお星様とか星とか言うときには、自ら光り輝く恒星のことを指していると思ってください。

お星様は、多くの場合集団を作っています。その集団のことを銀河と言います。集まっている星の数は、なまじっかの数ではありません。銀河は約 1,000 億個の星が集まっています。図 1 をご覧ください。あまりに多いので、1,000 億個の実感がわからないかもしれませんね。そして、さらに驚くことには、宇宙には、このような銀河がおおよそ 1,000 億個もあります。

銀河のなかには、図 1 の銀河のように、渦巻き状になっていて、回転しているものもあります。その回転速度が、今から 40 年程前の 1970 年頃から測られるようになりました。測ってみると、速度は中心付近を除き、どこでもほぼ一定で、銀河の端のところの回転速度も内側とほぼ同じでした。図 2 は、それをイメージで表したものです。

ダークマターが銀河を大きく取り囲む

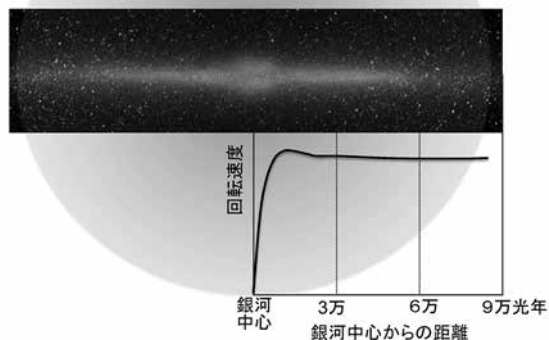


図 2：銀河の回転速度は銀河中心から離れてもほぼ一定である。これは、銀河をおおきくダークマターがとりかんでいるとすると理解ができます。図はそれをイメージとしてあらわしたものです。

実は、これは驚きなのです。銀河には明らかに広がった渦が見えますが、渦の部分が持つ質量は、中心部にくらべるとごくわずかで、銀河全体の質量のほとんどは中心付近に集中してあります。そうだとすると、その回転の為の重力の源は、中心だけにあるとみてよいので、回転速度は遠くにゆくと遅くならなくてはなりません。

といっても、すぐには分からないかもしれないので、同様の例として太陽系の惑星の公転速度を見てみましょう。太陽系では、質量のほとんどを太陽が担っています。図 3 に公転速度と軌道半径の関係を示します。太陽から遠くに行くにしたがって、速度が遅くなっています。速度は距離の平方根の逆数に比例しています。距離が 4 倍になると速度は半分になります。これは、ニュートンの力学の法則できれいに説明されます。

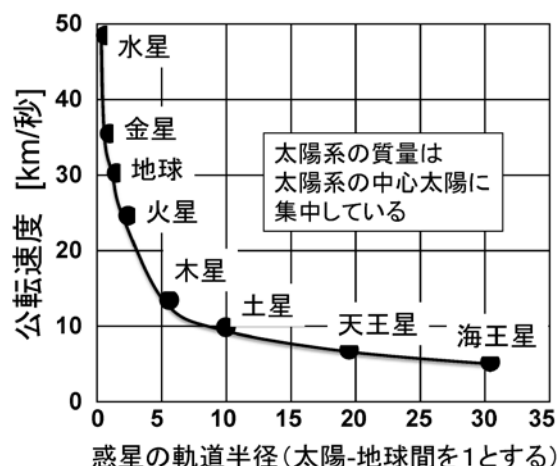


図 3：太陽系の質量は中心にある太陽に集中しています。このときそれぞれの惑星にはたらく重力は、太陽からの重力だけと思ってよいので、遠くにいくにしたがって、その公転速度は遅くなります。

銀河も質量が中心部に集中していれば、同様になります。さて、ここで注意しなくてはならないのは、これまで、銀河の質量といていたものは、我々が知っている原子・分子、即ち「見える」ものの質量です。したがって、銀河の回転速度が、どこまでも同じ速度であるということは、銀河の中心に集中している見える質量だけでは、銀河の回転速度は説明できないということになります。

この問題を解決するには、見える質量（我々の知っている原子・分子）に加え、目に見えない質量が、大きく銀河を取り囲んでいると考える必要があります。そうすれば、銀河の外に行くほど、その内側にある質量が多くなって、より強い重力でひっぱられることになり、回転速度が小さくならなくてもよいことになります。

この大きく銀河を取り囲んでいる見えない物質が、実はダークマターなのです。詳しく分析

すると、銀河^{ぎん が}には、原子・分子のほぼ10倍ものダークマターがあることが分かりました。

もちろん、遠くの銀河^{ぎん が}だけでなく、我が太陽系^{わが たいよう}がある銀河^{ぎん が}にもダークマターがあることがわかっています。

■ダークマターの証拠はそこら中に

ダークマターがあるという証拠^{しやうこ}は、他にもたくさんあります。銀河^{ぎん が}は数100個から数1,000個集まって銀河団^{ぎん が だん}というものを作っています。その銀河団もダークマターに包まれていることがわかりました。銀河団^{ぎん が だん}の中の一つ一つの銀河の運動は、他の銀河の及ぼす重力によって決まります。重力の源はとりもなおさず質量です。したがって、運動を観測することで、銀河団の質量^{しつりやう}が決められます。こうして決めた銀河団の質量^{しつりやう}を、目で見える質量と比べてみると、ここでも数十倍も多いことがわかりました。

さらに、宇宙の銀河の分布の観測の精度が向上し、より広範囲^{こうはん い}になってくると、銀河が多く集まっている部分と、何も無い空虚な部分^{くうきょ}があって、しかも銀河が集まっているところが紐状^{じよう}につながっているということが分かってきました。紐状^{じよう}につながった銀河にも、濃い部分と薄い部分^{うす}があって、濃いところが銀河団に相当するところです。このような構造を、「宇宙の大規模構造^{き ぼ こうぞう}」と呼んでいます。最近わかってきたことは、宇宙は、開闢時の密度の濃淡が^{はってん}発展して、濃いところにはさらに物質が集まります。増々濃くなり、薄いところからは物質が逃げてゆき、このような構造ができたということです。そして、このように濃淡が^{のうたん はってん}発展して構造が出来^{こうぞう}るためには、我々の知っている原子・分子^{われわれ}だけでは、物質量が足りなくて、ダークマターがなくてはならぬものということがわかりました。

このように、宇宙のあらゆるところにダークマターの影があるのです。ダークマターがなければ、星も銀河もできていませんでした。したがって、私達人間も存在^{われわれ}していなかったでしょう。ダークマターは我々が存在^{われわれ}するためにも必要なものだったのです。宇宙の母^{う ちゅう}というべきものかもしれません。宇宙全体を平均すると、

原子・分子の5～6倍は存在するということも最近分かってきました。

■ダークマターは我々のまわりにどのくらいある

宇宙は、3次元の編みもののように銀河が大規模構造^{き ぼ こうぞう}を作っていて、物質にも、ダークマターにも濃淡があります。宇宙全体をならすとダークマターは原子・分子の5～6倍ありますが、実際は場所場所によって、ダークマターの量だけでなく、ダークマターと通常の物質の割合も違います。我々の住んでいる銀河にまわりついているダークマターの量は、我々が住んでいる銀河の回転速度の測定から、1平方メートルあたり、陽子の重さに換算して約300,000個のダークマターがあると推測されています。これは、ダークマターの数ではなく、あくまでも、1個を陽子に換算してということですので、誤解^{かい}は禁物です。もし、ダークマターの質量が陽子の100倍なら3,000個になります。

■ダークマターは何か？

これまでの話で、ダークマターが、銀河や銀河団にまわりついていることは、確かなことであると思わざるを得なくなりました。そして、さらに長い宇宙の発展の歴史のなかで、どのようにして星や銀河が出来て来たのかという理由も、ダークマターを抜きにしては考えられません。

しかし、困った事に、それが何かということは、まったく分かっていません。目に見えない正体不明の透明人間みたいな連中です。私たちの知っている原子や分子あるいは、その親戚でないことは確かです。

ダークマターが何かという予想が、実はあります。そうした予想を手がかりになんとか正体を暴けないかと研究者は考えています。もちろん、予想どおりにゆかないのが研究です。そして、それがまた、研究の面白さ、醍醐味でもあります。しかし、出発点は、なんらかの予想にそって始めるのが普通です。

一つの予想によると、ダークマターの質量は、最も軽い原子である水素の重さの100倍程度か、それ以上で、重力の引き合う力の他にも、

通常^{つうじょう}の物質^{ぶつしつ}ともまれに^{はんのう}に反応^{はんのう}する、という^{こう}都合^{ごう}な候補^{こうほ}があります。

これを、弱い^{そう}相互作用^{こうさく}をする重い^{りゅう}粒子^し (WIMPs: Weakly Interacting Massive Particles) と呼^よんでいます。文字通り、たまにしか^{はんのう}反応^{はんのう}しない重い^{りゅう}粒子^し (素粒子) というのをそのまま英語にしたようなものです。wimp というのは、英語で「弱虫」のことです。物理学者はこうした語呂合わせが大好きです。

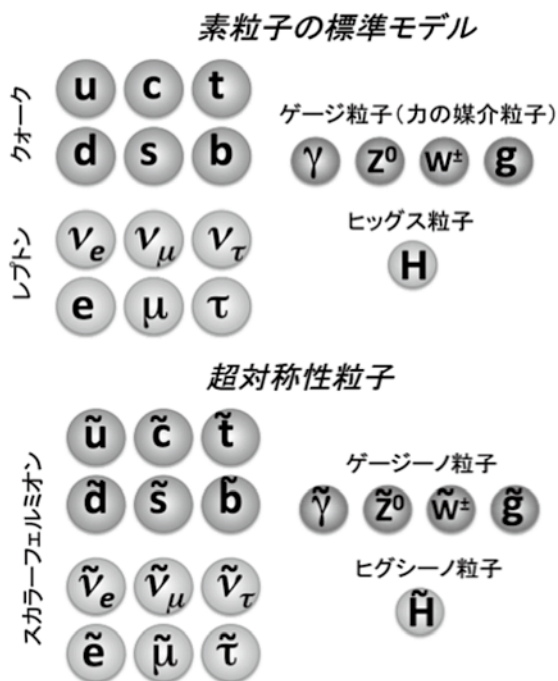


図4：現代の素粒子の標準モデルと超対称性粒子。超対称性粒子の中のゲージノ粒子の一部とヒグシーノ粒子、あるいは、これらの粒子が混じり合ったものが、WIMPs ダークマターの候補です。

この WIMPs ダークマターは、素粒子理論からも注目されています。素粒子ってなかなか馴染みのない、難しそうなものですが、我々は何でできているのか、物は何でできているのか、という好奇心に対する答えだと思ってください。それ以上細かく分ける事のできない物質の最も基本的な構成子のことです。

物質を細かく見てゆくと原子が見えてきます。原子、atom (アトム) は、もともとギリシャ語の a (否定) -tomon (分割) からきていて、分割できないものを意味していました。いまでは、原子は、陽子、中性子からなる原子核と、

そのまわりを回る電子からできていることを知っています。もはや、分割できないものではありません。陽子や中性子がクォークと呼ばれる素粒子から作られていることが、1970 年代に分かってきました。そして、電子とその仲間であるニュートリノをレプトンとよび、クォークと合わせて、現在の素粒子論で、物質をつくっている大本になります。それに、力を媒介する粒子 (ゲージ粒子) を加えて、素粒子の標準モデルは完成です。図1の上半分を見てください。おっと失礼、2012 年に発見されたヒッグス粒子が別格として必要ですね。

さてこれ以上、あまり素粒子の標準モデルには深入りしないで、WIMPs と素粒子理論の関係にもどりましょう。素粒子の標準理論では、物質の素粒子である、クォークとレプトンは、自転していると考えられています。すなわちコマのようなものだと思ってください。これに対して、力を媒介する粒子は、コマの性質をもっていません。高尚な考え方から、この標準理論は不完全で、超対称性粒子と呼ばれる一群の素粒子が存在して始めて、理論は完全になるとの考え方があります。超対称性粒子は、標準モデルの粒子に対して、コマの性質を逆転したものです。物質の素粒子がコマの性質を持たずに、力を媒介する粒子がコマの性質を持ちます。

そして、この超対称性粒子群は、宇宙が誕生したときに生まれますが、この粒子群は、すぐに、軽いものに崩壊してゆきます。この粒子群のなかで、もっとも軽いものは、通常の素粒子に変化することもできないので、ずっと生き延びます。それらが、ダークマターであると考えられます。図4にあるゲージノ粒子とヒグシーノ粒子がその候補です。

このように、WIMPs に素粒子理論の方から、超対称性粒子という大きな助け舟もあり、これが、ダークマターの最有力候補として、探索が続けられているのです。

もちろん、WIMPs 以外にも候補はありますが、今回は、WIMPs に限った話にします。

■ダークマターを捕まえる

さて、この WIMPs ダークマターを実験室に設置した検出器で直接見つけてやろうと、世界中で、一番乗りをめざして戦いが繰り広げられています。直接観測に成功したら、ダークマターと通常の物質との反応を直接的に見たことになり、反応の起こる割合や、ダークマターの重さの情報などが分かります。そして、その正体解明に重要な役割を果たします。さらに、この発見は、ダークマターの正体を見つけたということだけでなく、新しい素粒子を発見したことにもなり、宇宙と素粒子の大問題を解決してゆく、糸口を得ることになります。人類の宇宙観そして物質観を大きく変えることになるでしょう。

■直接検出のやりかた

ダークマターは、時々、検出器の物質と衝突して、物質の原子を跳ね飛ばします。我々の探している WIMPs というのは、時々、通常の物質と反応するという性質をもったダークマターです。この跳ね飛ばされた原子を何らかのやり方で、検出してやれば、ダークマターを観測したことになります。

跳ね飛ばされた原子は、周りの原子にエネルギーを与え、除々に止まってゆきます。その時、周りの原子を動かしたり、エネルギーの高い状態にしたり、電離したりします。それら状態の変化した周りの原子が元にもどる時に、光を出したり、発熱したりします。これらの発せられた光や熱、そして、電離そのものも利用して検出をすることができます。

検出の為の様々な技術が開発されています。信号と見まがうようなノイズ（我々の言葉で、バックグラウンドと言います）を減らす為に、光の観測と電離など2つの方法を組み合わせることや、大型装置を作って外からのバックグラウンドが少なくなる装置の中心部だけを利用するなどの方法もあります。それぞれ、長所短所があり、実験屋の腕の見せ所です。

■ダークマターの風

ダークマターは、銀河にまとわりついて、ランダムな方向に飛んでいます。ダークマターが

それぞれに持っている運動エネルギーに対応する速さは 270km/秒 程です。もちろん、好き勝手な方向にとんでいるので、全体を平均するとその速度は0になります。

太陽は、銀河の回転といっしょに運動しています。したがって、銀河の回転速度、秒速 230km で、ダークマターの中を突き進んでいます。実際、その方向はわかっていて、太陽は白鳥座の方向にむかってすすんでいます。逆に、太陽からみると、平均 230km/秒 のダークマターの風が白鳥座の方向から吹いているのです。

我が地球も太陽と同じように考えてよいのですが、ダークマターの検出には、地球の公転の影響も考える必要があります。地球の公転速度は 30km/秒 なので、銀河の回転速度（太陽の速度）の 230km/秒 と比べて、そんなに無視できる値ではありません。この地球の公転はおもしろい効果を引き起こします（図5）。

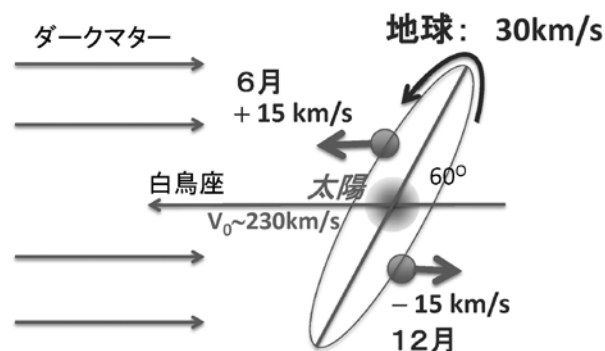


図5：ダークマターの風と地球の公転

太陽が突き進む方向に対して、地球の公転面は60度傾いています。したがってこの公転速度は、季節によって最大 $+15\text{km/秒}$ から -15km/秒 変化します。実は、冬が -15km に相当して、夏が $+15\text{km}$ になります。言い換えると、地球に吹いてくるダークマターの風の速度は、冬は 215km/秒 で、夏は 245km/秒 になります。単純には、とおりぬけるダークマターの数の差が冬と夏で13%程違うことになります。したがって観測できるダークマターの信号数に違いがでてきます。実際は、ダークマターの速さによって反応の起こりかたが違うので、少し複雑になりますが、この季節変動は、ダークマター探索の大きな手がかりになります。

■神岡の実験

ニュートリノで有名な神岡でも、ダークマターの探索実験を2011年から始めました。XMASSと呼ばれる液体キセノンを用いた実験です。この実験では、ダークマターがキセノンに衝突したときに発せられる光「シンチレーション光」を検出することで、ダークマターを捉えます。

このシンチレーション光が出る仕組みはキセノンの場合かなり複雑です。簡単にいうと、ダークマターにけり動かされたキセノンが周りのキセノンにエネルギーを与えます。エネルギーを得たキセノンは、2つくっついた分子状のものをつくりまします。この分子状のものが最後にエネルギーを光として放出します。この光は、波長が173nm（ナノメートル）という紫外光です。[1ナノメートルは10億分の1メートルです]



図6:XMASS測定器。液体キセノンを使い、ダークマターがキセノンと衝突したときに発する光を捉えます。放射線不純物の少ない無酸素銅と呼ばれる特殊な銅が容器の素材です。

この光を測定器の内面に配置した642本の光センサーが捉えます。XMASS実験では、約850kgの液体キセノンが、光のセンサーより内側に蓄えられています。WIMPs探索には、中心部の100kgを使用します。測定器はそんなに大きなものでなく、内径がわずか80cmです。

検出するエネルギーは、陽子の100倍の重さのものが秒速230kmで走っている時の運動エネルギーです。これは、ニュートリノ検出器、スーパーカミオカンデで捉えるエネルギーの1,000分の1という、とてつもなく小さなものです。しかし、キセノンの発光は、ニュートリノが水中で反応（はんのう）して出す光に比べて、1,000倍以上ありますから、観測するこ

とが可能になるのです。

光を見るだけの実験なので、比較的簡単な実験装置になり、大きくしてゆくことも楽にできるという長所があります。

■ダークマターの信号を見つけて、確実な証拠としてゆくには

ダークマターの信号は、低いエネルギーのところにピークができます。それは、たとえば、ボーリングのピンを倒そうとしたとき、正面衝突してはげしく跳ばすよりも、横にあたったりかすったりして、軽く横に蹴飛ばす方がはるかに多いでしょう（うまい人は、真正面にばかりあたるなどと言わないでください）。軽く横に飛ばされたピンの持つエネルギーは小さくなります。ダークマターの探索でも、こうして、低いエネルギーのところに、ピークが出てくればしめたものです。何かを見つけたといって、発表することができます。これで、おおよその反応の頻度がわかります。但し、これだけでは、曖昧さが残ります。次は、低いエネルギーのところにできたピークの詳しい形の測定を行います。実は、ダークマターの質量（重さ）によって形が違ふのです。したがって、この形を詳しく観測してやると、ダークマターの重さがわかります。しかし、ここまで測定できても、このピークが、ダークマターでない他の原因、バックグラウンドである可能性は排除できません。そこで、次のステップでは、先ほど述べた、季節変化を調べます。この為には、信号の数が沢山いるので測定器を大きくする必要があるかもしれません。季節変動があれば、誰もが信じるダークマターの証拠ということになります。

■なぜキセノンを使う。

なぜ、キセノンをダークマターの観測に使うのでしょうか。キセノンは希ガスで、空気中に約0.1ppm（1,000万分の1）含まれています。とても良い蛍光物質で大きな発光量があります。発光量が多いと、同じ反応がおこっても沢山の光がでるので、低いエネルギーまで測定することができます。ダークマターの探索では、

低いエネルギーまで観測できる方が発見の可能性が高いので、キセノンは検出器の物質として「良い」ということになります。

また、我々が見つけようとしているダークマターの質量は、水素の100倍あるいはそれ以上です。キセノンは水素の約130倍なので、ダークマターの質量とほぼ同じ位ではないかと思われています。

質量が同じ位のものに衝突すると、持っているエネルギーを全部渡すことが可能です。それは、振り子をつるしておいて、もう一つの同じ重さの振り子をぶつけた時に、正面衝突させると、飛んで来た振り子は止まり、当たった振り子は、飛んで来たものと同じ速さで飛ばされるということからもわかるでしょう。ダークマターが同じ位の質量のものにあたったら、エネルギー移行が大きく検出しやすいのです。

液体キセノンの密度は3 g/cm³ですので、約850kgが、直径80cmに収まってしまいます。コンパクトな検出器ができるというのも、メリットの一つです。

キセノンのもう一つの大きな特徴は、原子が重い、原子番号が大きいので、外から入って来たガンマー線など、ダークマターの信号と間違えてしまうようなものは、入ってすぐ反応します。すなわち、ガンマー線は、測定器に入ったところでキセノン自身に阻まれて検出器の奥、中心部に入ってくることができません。したがって、ダークマターを探索するのに、測定器の中心に近いところだけを利用すれば、外からのガンマー線などのバックグラウンドに邪魔されずに感度の良い観測ができます。

バックグラウンドを落とすという観点からは、キセノン検出器は、他にみない、大きな利点があります。キセノンは通常は気体です。検出器には、マイナス100度に冷やして液体の状態を使います。液体ならキセノンに不純物が含まれることが後から分かっても、それを測定器の外部に設置されたフィルター等との間を循環するなどして、取り除くことができます。半導体検出器等は、一度作ると後から検出器そのものを奇麗にすることはできません。

■実験のキーポイント

ダークマター探索実験の大事な点は、これまでの話でもお分かりのように、ノイズ、我々の言葉で言うバックグラウンドを如何に低減するかです。今後の探索には、バックグラウンドを信号領域で100kgあたり、数十日に一回以下にする必要があります。このバックグラウンドのレベルが如何に大変なものか、例をあげましょう。

人間は、放射線を放っているといったらびっくりするかもしれません。人の元素組成は、主なもの、水素が60%、酸素が25%、炭素が10.5%です。実は、炭素には炭素14という放射線同位元素（放射能を出す炭素）が、ほぼ、100億分の1含まれています。そんな微量なものが含まれていようといまいと、関係ないようにおもうでしょうが、これが、ダークマター探索で気にしなくてはならない放射線のレベルなのです。

この炭素14の崩壊寿命が5,700年なので、体重が60kgの人は、炭素14が毎秒1,500回崩壊していることになります（1,500ベクレル/60kg）。これを我々の測定器の重さに対応させると、100kgの重さに対して100日に130億回崩壊が起こることになります。我々の実験は、バックグラウンドを100日に一回程度にしないといけないので、このバックグラウンドレベルの100億分の1程度にする必要があります。如何に大変な実験であることがお分かりいただけたでしょうか。

■ダークマターは見つかるか

XMASSは、最初に実験を開始したときに、予期せぬバックグラウンド源が見つかり、その影響を低減するために測定器の改修作業をして、昨年末からデータを再開収集しています。

そして、世界中で、いくつもの実験がダークマターをとらえようとしています。しかし、現在まで、どの実験グループも、万人が納得するようなダークマターの直接証拠を捉えていません。苦しい道のりですが、近いうちに、どこかで、ダークマター発見のニュースを耳にすることができるかもしれません。